

# 红壤丘陵区生猪规模化养殖及其对土壤与水环境的影响

## ——以江西省余江县为例\*

周志高<sup>1</sup> 李忠佩<sup>1</sup> 何园球<sup>1</sup> 王兴祥<sup>1,2†</sup>

(1 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 江西省红壤生态研究重点实验室, 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

**摘要** 以南方红壤丘陵典型地区——江西省余江县为案例, 研究了规模化养猪业发展现状及其对周边土壤和水环境的影响。结果表明, 余江县 2011 年 389 家规模化养猪场出栏 73.2 万头, 其中年出栏 1 000 ~ 5 000 头的猪场占规模化猪场总数 50.6%。规模化猪场主要分布在中南部的低丘缓岗地带, 尤其集中分布于 320 国道沿线。全县规模化养猪的粪、尿、污水年产生量分别约为  $2.96 \times 10^5$  t、 $4.64 \times 10^5$  t、 $1.09 \times 10^6$  t, COD、N、P、Cu、Zn 污染物年排放量分别为  $1.96 \times 10^4$  t、 $3.27 \times 10^3$  t、 $1.25 \times 10^3$  t、50 t 和 116 t。据估算全县 110 万头生猪养殖的粪、尿、污水年产生量分别约为  $4.47 \times 10^5$  t、 $7.00 \times 10^5$  t 和  $1.09 \times 10^6$  t, COD、N、P、Cu、Zn 污染物年排放量分别为  $2.96 \times 10^4$  t、 $4.94 \times 10^3$  t、 $1.89 \times 10^3$  t、76 t 和 176 t。规模化猪场周边采样水体有 90.9% 山塘、66.6% 水库、50% 河流的水体水质属于劣 V 类; 土壤养分严重失衡, 速效磷过量积累, 重金属 Cu、Zn 在土壤中也有明显积累。因此, 应加强区域生猪养殖业发展规划及规模养猪粪污无害化、资源化循环利用技术研究, 以促进红壤丘陵区规模养殖业健康发展与生态环境保护。

**关键词** 规模化养猪; 排放量; 水体污染; 磷素积累; 红壤丘陵区

**中图分类号** S19 **文献标识码** A

中国是世界第一养猪大国。2010 年, 年末生猪存栏数 4.64 亿头, 生猪出栏量 6.67 亿头, 约占世界生猪总出栏量的 50%<sup>[1-3]</sup>。近年来我国规模化养猪发展迅猛, 集约化、专业化养猪企业逐年增多, 传统的农村养猪散户则迅速减少, 2010 年规模化养猪场的年出栏量占总出栏量的比例约 50%, 预计到 2015 年将达到 65%<sup>[2-3]</sup>。与此同时, 规模化养猪模式也带来了粪污过度集中、冲洗污水大量增加等新问题, 因此, 在发达国家规模化养猪场与工业企业一样被视为一个点源性污染源, 其排放的固液废弃物必须满足一定的排放标准<sup>[4]</sup>。由于各种原因, 我国规模化养猪场产生的粪污大多采用地下沼气池对养殖粪污进行了初步处理就排入环境, 甚至未经处理直接排放, 因而规模化养猪业的无序发展已经产生了巨大的环境压力, 在局部地区甚至导致了严重的环境污染<sup>[5-7]</sup>。

南方红壤丘陵地区水热条件优越, 是我国重要的

粮食和畜禽生产基地, 其中湖南、江西、广西的年生猪出栏量都超过 2 000 万头, 生猪养殖成为该地区畜牧业的主体<sup>[8]</sup>。近年来, 随着南方红壤丘陵地区规模化养猪业的快速发展, 所伴生的大量粪便污水是导致该地区环境恶化的主要污染源之一, 环境污染压力日趋严峻<sup>[7,9]</sup>。余江县位于赣东北, 是我国红壤丘陵地区生猪规模化养殖快速发展的一个缩影<sup>[10]</sup>, 本文以余江县作为案例, 在县域尺度上研究规模养猪业发展现状、粪便污水排放特征及其对周边农田土壤和山塘水库环境质量的影响, 为进一步探讨县域规模化养殖的合理布局与污染防治对策, 促进南方红壤丘陵地区规模养猪业的健康发展提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

余江县位于江西省的东北部, 赣江支流信江的中下游。地处东经  $116^{\circ}41'$  ~  $117^{\circ}09'$ , 北纬  $28^{\circ}04'$

\* 公益性行业(农业)科研专项项目(201203050)、中国科学院院地合作项目和赣鄱英才 555 工程专项资助

† 通讯作者: E-mail: xxwang@issas.ac.cn

作者简介: 周志高(1971—), 男, 湖南茶陵人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业资源利用及其环境效益面的研究。Tel: 025-86881577;

E-mail: phosphor@issas.ac.cn

收稿日期: 2012-09-27; 收到修改稿日期: 2013-01-19

~28°37'之间,总面积为 937 km<sup>2</sup>。余江县属亚热带湿润季风气候,气候温和,雨水充沛,日照充足。年平均气温为 17.6℃,年平均降水量 1 789 mm,年平均日照时数 1 739 h,无霜期 258 d。地貌特征为南北高,逐渐向中部倾斜,丘陵面积  $7.2 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,平原面积  $2.0 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,山林面积  $3.9 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,耕地  $3.2 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>,其中水田  $2.8 \times 10^4$  hm<sup>2</sup>。河系发达,山塘水库遍布,水域面积  $9 \times 10^3$  hm<sup>2</sup>,其中可养水面  $2.5 \times 10^3$  hm<sup>2</sup>。余江县畜牧业发展迅速,2010 年畜牧业产值为 14.2 亿元,占农业总产值的 58.2%。余江县的畜牧业主要包括猪、牛、马以及家禽(鸡鸭)养殖,2010 年末大牲畜(牛、马)存栏数为 3.4 万头,家禽(鸡鸭)年末存笼数 296 万只,年末生猪存栏数为 62.9 万头,生猪出栏数为 106.5 万头,生猪产值约占畜牧业总产值的 82%,是江西省“十强”养猪大县之一<sup>[10]</sup>。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 规模化养猪现状调查** 2011 年 11 月—12 月,在余江县畜牧局的协助下,调查了全县的规模化养猪场。根据农业部统计标准<sup>[8]</sup>,年出栏生猪 50 头及以上且有独立养殖场区的猪场均视为规模化猪场,包括养猪专业农户和养猪企业。本此实地调查了 339 个规模化猪场,约占全县规模化养猪场总数的 87%。其他 50 个规模化猪场由于交通不便而难以到实地调查,因而采用了通信调查方式。调查内容包括猪场的基本信息(名称、建立时间、隶属乡镇等)、地理信息(经纬度、所处地形、周边土地利用、接受水体、距离村庄距离等)、生产情况(母猪数、生猪存栏数、年出栏数)、粪便污水处理方式(干清、水冲;厌氧发酵处理、堆沤、直排等)、粪污利用途径(还田、养鱼、直接外排等)等。此外,农户散养的母猪数、年生猪出栏数、年末生猪存栏数等数据则来自余江县畜牧局的调查统计资料。

**1.2.2 数据收集和样品采集** 按照年出栏数将猪场划分为 < 500、500~1 000、1 000~5 000、5 000~10 000、> 10 000 头等 5 个养殖规模<sup>[8]</sup>,从每一种规模猪场中选取 3~5 个典型猪场进行详查,通过与一线养殖工人或当地畜牧技术员访谈了解猪场的母猪、仔猪、育肥猪的日粪尿产生量以及猪舍冲洗水用量等,并采集猪粪、污水、接受水体、周边农田土壤等样品,分析测定 pH、化学需氧量(COD)、N、P、重金属(Cu、Zn)等指标。猪粪从猪场旁边的猪粪堆放池中采集。污水从总排污口处采集,对于部分没有总排污口的中小型养猪场,选择一处正在排

污或有缓冲池的排污口采集污水样。由于当地猪场的猪尿与冲洗污水一般是通过同一通道排放,因此在猪舍排污口采集到的污水样实际上是猪尿与冲洗污水的混合样。猪场附近的受纳水体根据水体类型及其水体面积采用适当的采样方法。对于水体面积超过 3 hm<sup>2</sup> 的山塘水库,在距污水入塘(库)口约 150 m、距堤岸 10 m 处采集水样(水深 50 cm 处);对于水体面积小于 3 hm<sup>2</sup> 的山塘,则选择其一边塘堤于中间位置距堤岸 10 m 处采集水样(水深 50 cm 处);对于河流小溪,在在污水入河口的下游约 5 m、距堤岸 10 m 处或小溪中间线采集水样。稻田土壤采样点进一步区分为近猪场稻田(< 100 m)和远猪场稻田(> 100 m),远猪场稻田没有接受过猪场排放污水,也很少施用猪粪,可视作对照点。

**1.2.3 样品分析方法** 样品的处理与分析参照文献<sup>[11-12]</sup>以及有关国标方法执行。即猪粪中的 N、P 含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法消解,凯氏蒸馏法测氮、钼蓝比色法测磷,重金属含量采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 密封罐法消解—原子吸收法测定;水样中的 N、P 含量采用流动分析法测定,重金属含量采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> 法消解—原子吸收法测定;猪粪和水样中的 COD 采用重铬酸钾法测定;土壤碱解氮采用扩散法测定,速效磷采用 Olsen 法测定,速效钾采用中性醋酸铵法测定,Cu、Zn 含量采用 HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-HF 法消解—原子吸收法测定<sup>[11-12]</sup>。

## 1.3 数据分析与制图

**1.3.1 猪场粪便污水年产生量、污染物质年排放量的估算** 规模化养猪场产生的固废废弃物主要是猪粪、猪尿和冲洗污水,其年产生量为猪饲养量、饲养天数、粪尿污水日产生系数的乘积。本文以猪场的生猪年出栏量与能繁母猪数之和作为猪场的年度饲养量,当地的生猪(肉猪)生产周期平均为 160 d,即出栏生猪的饲养天数为 160 d,而母猪饲喂天数为 365 d;生猪、母猪的粪尿日排泄系数与冲洗污水日产生系数来自国家环境保护总局公布的推荐值与有关文献<sup>[5-6, 13]</sup>,并根据调查到的实际情况进行修正,具体见表 1。具体计算方法为:猪粪(猪尿或冲洗污水)的年产生量=(年生猪出栏量×日排泄或产生系数×160)+(母猪数×日排泄或产生系数×365)。对于少数几个专门生产仔猪出售的规模化养猪场,则根据仔猪的生产周期(30 d)及其粪便污水日产生系数(为表 1 系数的 2/3)计算出仔猪转换为出栏生猪当量的系数为 0.125(=30÷160)

×2/3),将年猪仔出栏量折算为标准的年生猪出栏量,用于年生猪出栏总量、年粪尿污水产生量等有关指标的计算。

鉴于猪粪、猪尿、冲洗污水的污染物质含量受到饲料、猪的品种、猪发育阶段等许多因素的影响,而且当地规模化猪场的猪尿、冲洗污水混在一起排放而难以区分,因而在计算生猪养殖的污染物质排放量时,只考虑产生污染物质排放的源头废弃物猪粪与猪尿,其主要污染物质含量参数引自国家环境保护总局公布的数据与有关文献<sup>[5,14-15]</sup>,有关参数值列于表2。污染物质排放量的计算方法为:污染物质(COD、N、P、Cu、Zn)年排放量=(猪粪年产生量×猪粪中污染物质含量)+(猪尿年产生量×猪尿中污染物质含量)。

由于散户养猪方式一般没有冲洗污水的产生,因而其固液废弃物仅有猪粪与猪尿,而且散户养猪的饲料来源与组成非常复杂,但目前尚没有关于农

村散户生猪养殖的猪粪尿日产生系数与污染物质含量水平的可靠数据,因而散户养猪的粪尿年产生量、污染物质年排放量估算也采用表1、表2中的参数值,计算方法同上。

**1.3.2 统计分析制图** 均数差异显著性检验采用 Excel 统计分析工具中的 t 检验方法。制图采用数字化技术,即以余江县地图的扫描图片为底图,利用 ArcView 软件进行空间定位,对重要地物进行数字化,并按照各养猪场经纬度建立养猪场点位分布图层,建立猪场饲养量属性字段,输入各养猪场实际饲养量,并分为5个不同的级别,代表不同的猪场规模,然后进行相应的空间分析,并按照规模大小制成全县养猪场养殖规模的空间分布图<sup>[16]</sup>。采用通讯调查的50个猪场没有采集到经纬度数据,因而猪场空间分布图中不包括这些猪场,但这些猪场所占比例很小,因此,缺失这些猪场并不影响全县猪场空间分布特征的分析。

表1 猪的日粪尿污水产生系数与饲养周期

Table 1 Daily output of dung, urine and wastewater from breeding cycle of a pig

生猪类型 Type of pig	粪 Dung (kg head <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	尿 Urine (kg head <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	冲洗污水 Wastewater(kg head <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )	饲养周期 Breeding cycle(d)
肥猪 Hog	2.0	3.3	8.0	160
母猪 Sow	4.0	5.0	10.0	365

表2 猪粪(鲜样)、尿中的主要污染物质含量

Table 2 Contents of primary contaminants in pig dung and urine on fresh weight basis

样品 Sample	COD <sup>1)</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Cu <sup>2)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn <sup>2)</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
粪 Dung	52	5.88	3.41	170	393
尿 Urine	9	3.30	0.52	6.40 × 10 <sup>-4</sup>	2.44 × 10 <sup>-4</sup>

1) COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; 2) 猪粪鲜样 Cu、Zn 含量是按照 75% 含水量由猪粪干样 Cu、Zn 含量换算而得<sup>[14]</sup> Concentrations of Cu and Zn in pig dung on fresh weight basis were calculated by a factor of 75% water content from those measured using dried dung samples<sup>[14]</sup>

## 2 结果与讨论

### 2.1 余江县养猪场的规模与产量

调查表明,2011 年余江县的生猪出栏总量约为 110 万头,其中规模化养殖的出栏量约 73 万头,占 67%;能繁母猪总数约为 6.5 万头,其中规模化养猪有 4.2 万头,占 65%(表3)。余江县的养猪规模化水平高于全国生猪养殖规模化平均水平(60%),规模化养猪场已是余江县生猪养殖的主体。当地规

模化猪场基本是采用自繁自养生产模式,每头母猪的年平均肥猪出栏量为 17 头,达到全国平均水平,但与发达国家每头母猪年平均肥猪出栏量 25 头的水平相比,当地的生猪养殖技术与管理水平与我国其他地区一样,仍然处于较低的水平<sup>[2-3]</sup>。

余江县规模化养猪场数量以年出栏 1 000 ~ 5 000 头的中型养猪场为主,约占全县规模化养猪场数量的 50.6%,年出栏 500 头以下的小规模猪场占 18.3%,而年出栏 5 000 头以上的大型养猪场很少,仅占 6.2%,年出栏 10 000 头以上的超大规模猪场

仅占 1.2% (表 4)。余江县规模化养猪场的年出栏量同样以 1 000 ~ 5 000 头猪场为主体,其年出栏量占全县规模化养猪场年出栏总量的 57.2%,年出栏 500 头以下小型猪场的数量虽然比年出栏 10 000 头以上大型猪场多,但前者的年出栏量却不及后者的 1/3,年出栏 10 000 头以上大型猪场的年出栏量占规模化养猪场年出栏总量的 12.3% (表 4)。当地的家庭养猪专业户经营的规模化养猪场,受资金、

技术以及劳动力的限制,养殖规模一般维持在年出栏 1 000 头以下,年出栏 1 000 头以上的养猪场一般是企业化操作,专业化、集约化程度较高。余江县年出栏 1 000 头以下小规模猪场的数量仍然占有较高的比例(43.2%),这一方面是由于起伏的丘岗地形条件比较适合于建设中小规模猪场,另一方面是当地经济发展水平决定了当地养猪场的规模化程度,几个超大型猪场均是通过招商引资建成的<sup>[10]</sup>。

表 3 余江县规模化养猪现状

Table 3 Status quo of scale pig farming in Yujiang County, Jiangxi Province, China

项目 Item	生猪年出栏量 Annual fattened hog marketing rate (head)	能繁母猪数 Fertile sow (head)
规模化养殖 Scale pig farming	$7.32 \times 10^5$	$4.24 \times 10^4$
全县总量 Total	$1.10 \times 10^6$	$6.54 \times 10^4$
百分比 Percentage	66.6%	64.9%

表 4 余江县不同规模化养猪场的比重及其对年出栏总量的贡献率

Table 4 Proportions of pig farms different in scale and their contributions to the annual total fattened pig marketing rate in Yujiang County, Jiangxi Province, China

养猪场规模 <sup>1)</sup> Size of pig farm (head)	占规模化养猪场总数的百分比 Percentage to the total scale pig farms (%)	占规模化养猪场年出栏总量的百分比 Contribution to the total annual fattened pig marketing rate (%)
< 500	18.3	3.4
500 ~ 1 000	24.9	10.3
1 000 ~ 5 000	50.6	57.2
5 000 ~ 10 000	5.0	16.8
> 10 000	1.2	12.3

1) 猪场规模以年出栏量划分 Scale of pig farms was grouped by its annual pig output

## 2.2 余江县规模化养猪场的空间分布

余江县的规模化养猪场主要分布在县域中南部的低丘缓岗地带,集中分布在 320 国道的两侧,而在余江县北部的低山中岗地区分布很少(图 1)。余江县中南部位于白塔河的中下游流域,河系发达,山塘水库遍布,水资源非常丰富,非常适合规模化养猪场用水量大的需求,再加上 320 国道、沪昆高速(G60)、济广高速(G35)从这里经过,交通便利,因此,区位优势推动了规模化生猪养殖在这一地带迅猛发展。但是,由于养猪场的粪便污水一般是就近排放,因而养猪场过度集中分布也造成局部地区的环境负荷过大,容易导致局部区域环境质量恶化,养猪场布局过于集中的弊端日益凸显。此外,家庭经营的小型猪场为了管理方便,一般建在村庄附近,随着村庄建设的扩展,这些猪场实际已经位于村庄以内甚至是中心地带。调查表明,约有 43.6% 的猪场位于距离村庄 1 km 范围

内,约有 14.4% 的猪场位于距离村庄 100 m 的范围内,猪场引起的污染已严重影响周边群众的生活质量。这些问题在我国其他生猪养殖地区也同样存在<sup>[5,7]</sup>。有研究表明,该地区近几年大气氮沉降明显增加,这可能与近年来规模养猪迅速发展有关<sup>[17-18]</sup>。

## 2.3 余江县规模化养猪场的固液废弃物与主要污染物质的排放量

根据表 1 和表 3,可以计算出余江县养猪业每年所产生的废弃物的数量,再根据表 2 可以计算出余江县养猪业每年所产生的主要污染物质的数量(表 5)。余江县规模化养猪场的猪粪、猪尿、冲洗污水年产生量分别高达  $2.96 \times 10^5$  t、 $4.64 \times 10^5$  t 和  $1.09 \times 10^6$  t,全县猪粪、猪尿、冲洗污水年产生量分别为  $4.47 \times 10^5$  t、 $7.00 \times 10^5$  t 和  $1.09 \times 10^6$  t。由于农村散户养猪基本上不产生冲洗污水,污水年排放量全部来自规模化养猪场。余江县规模化养猪所

产生的 COD、N、P、Cu、Zn 年排放量分别为  $1.96 \times 10^4$  t、 $3.27 \times 10^3$  t、 $1.25 \times 10^3$  t、50 t 和 116 t,包括散户养猪在内的全县生猪养殖所产生的污染物质年排放总量则分别约为  $2.96 \times 10^4$  t、 $4.94 \times 10^3$  t、 $1.89 \times 10^3$  t、76 t 和 176 t。规模化养猪场是余江县生猪养殖固液废弃物与主要污染物质的主要来源,这与规模化养猪占主体相一致。

本研究的监测结果表明,猪粪、污水的污染物质含量变幅较大(表 6)。其差异可能是由于猪品种、发育阶段、饲料添加剂类型与用量、清粪时间、样品采集时间等因素有关<sup>[19-21]</sup>。本次监测的猪粪 COD、N、P、Cu、Zn 平均含量与国家环境保护总局推荐的污染物排放估算参数有一定的差异,其中 N、P、Zn 的监测值与参数值很接近,而 COD 监测值明显高于参数值,Cu 则正好相反(表 2、表 6)。除 N、P 外,污水中其他污染物质的浓度平均值均高于猪尿中相应污染物质浓度的参数值(表 2、表 6),这主要是因为污水中不仅有猪尿,也有冲洗猪圈时带入的污染物质含量较高的猪粪残渣,除 N、P 外的其他污染物质的浓度总体上表现为增加,而猪尿与猪粪的 N、P 含量相差不大,冲洗水的稀释效应可能大于猪粪残渣增加效应,从而使污水 N、P 浓度表现为降低,具体原因有待研究。徐谦等<sup>[13]</sup>对北京市规模化养猪场的研究也表明,猪场污水的 N、P 含量低于表 2 中给出的猪尿 N、P 含量参数值。

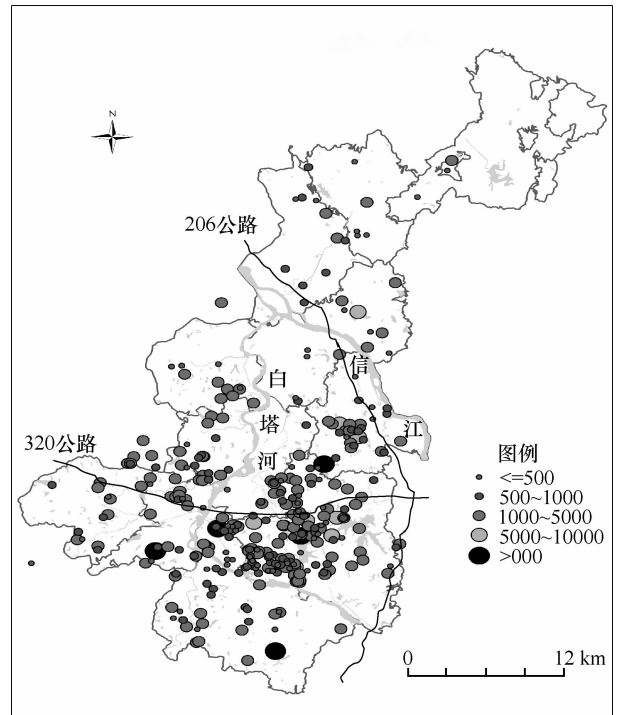


图 1 余江县规模化养猪场的空间分布

Fig. 1 Distribution of scale pig farms in Yujiang County, Jiangxi Province, China

## 2.4 规模化养猪粪污排放方式及其对周边水体和农田土壤环境的影响

余江县规模化养猪场存在三种清粪方式:(1)干清粪方式。90%的规模化养猪场采用干清粪

表 5 余江县规模化养猪的固液废弃物与主要污染物质的产生量

Table 5 Annual output of solid and liquid wastes and major pollutants from scale pig farming in Yujiang County, Jiangxi Province, China

项目 Item	粪 Dung	尿 Urine	冲洗污水 Wastewater	COD	N	P	Cu	Zn
规模化养殖 Scale pig farming	$2.95 \times 10^5$	$4.64 \times 10^5$	$1.09 \times 10^6$	$1.96 \times 10^4$	$3.27 \times 10^3$	$1.25 \times 10^3$	50	116
全县总量 Total	$4.47 \times 10^5$	$7.00 \times 10^5$	$1.09 \times 10^6$	$2.96 \times 10^4$	$4.94 \times 10^3$	$1.89 \times 10^3$	76	176
百分比 Percentage	66.0%	66.3%	100%	66.2%	66.2%	66.1%	65.8%	65.9%

表 6 余江县规模化养猪场猪粪、污水中主要污染物的浓度

Table 6 Concentrations of primary pollutants in pig dung and wastewater from scale pig farms in Yujiang County, Jiangxi Province, China

样品 <sup>1)</sup> Sample	COD		N		P		Cu		Zn	
	范围 <sup>①</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	平均值 <sup>②</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	范围 <sup>①</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	平均值 <sup>②</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	范围 <sup>①</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	平均值 <sup>②</sup> (g kg <sup>-1</sup> )	范围 <sup>①</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	平均值 <sup>②</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	范围 <sup>①</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	平均值 <sup>②</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )
粪 Dung	104.5 ~ 291.7	183.7	3.0 ~ 12.7	6.77	0.74 ~ 6.96	3.46	9.1 ~ 124.5	47.7	92.4 ~ 956.7	371.4
污水 Wastewater	1.6 ~ 54.6	17.4	0.13 ~ 7.58	1.34	0.003 ~ 0.055	0.018	0.02 ~ 0.85	0.24	0.03 ~ 7.08	1.50

1)  $n = 20$ ; ① Range; ② Mean

方式,即每天或每隔几天将猪舍里的猪粪清出,集中堆腐处理,随后用水冲洗猪舍地面上的猪粪残渣,冲洗污水通过排放通道排出猪舍。猪尿自然流入排放通道,猪尿与冲洗污水共用排放通道。(2)干清粪与水冲粪混合方式。9%的规模化养猪场采用这一清粪方式,这些养猪场一般建在山塘、水库边上,猪粪随水冲入水体,成为鱼饲料。根据养鱼规模和鱼生长阶段,调节猪粪投放量,猪粪过剩时则采用干清粪方式。(3)水冲粪方式。为1%的规模化养猪场所采用。猪粪经堆腐处理后,可作为饲料用于养鱼,也可作为有机肥施于菜地、果园、苗圃以及大田。调查表明,当地猪粪还湖塘养鱼的比例约占猪粪总产出量的50%,还田(包括施用于菜地、果园、苗圃及大田等)占50%。这一猪粪利用特点与其他地区有所不同,这主要是因为南方红壤丘陵地区山塘水库众多,用猪粪养鱼较为普遍。

调查结果显示,余江县61.5%的规模化养猪场没有沼气池处理设施,这些猪场排放的污水一般经过简陋的沉淀池处理,然后直排环境,已成为当地水污染和土壤污染的重要来源。即使有沼气池处理系统的养猪场,经沼气池系统处理后的排放废水

中仍然含有较高浓度的COD、NH<sub>4</sub>-N、P以及Cu、Zn,比照《畜禽养殖业污染物排放标准(GB18596-2001)》或《污水综合排放标准(GB8978-1996)》,COD、NH<sub>4</sub>-N超标率为100%,P超标率为88%,Cu、Zn超标率则较低,分别为25%和38%(表7)。一般情况下,经过沼气池系统处理后,污水的COD应该大幅降低<sup>[22-23]</sup>,但余江县规模化猪场污水经沼气池系统处理后,仍然含有很高的COD浓度(表7)。调查中了解到当地大部分沼气池运行数年后一直没有清渣,产气能力有所下降,这可能是厌氧分解过程受阻,从而降低了沼气池对猪场污水的处理效果,具体原因有待进一步研究。虽然沼液是N、P、Cu、Zn含量丰富的液体肥料,但由于存在运输方面的困难,规模化养猪场的沼液只能被附近的农田消纳一小部分,大部分沼液直接外排而成为污染源。有研究表明,沼气池与人工湿地组成的复合处理系统对猪场污水中的N、P、重金属具有很好的去除效果,流出水能够达到国家规定的排放标准<sup>[24]</sup>。余江县应加强规模化生猪养殖污水无害化、资源化利用技术的研究、开发与应用,从源头上减少与控制污染物向环境的排放。

表7 余江县规模化养猪场沼气池处理系统排放废水的有关指标( $n=8$ )

Table 7 Some relevant indices of wastewater discharged from bio-gas systems of the scale pig farms in Yujiang County, Jiangxi Province, China ( $n=8$ )

指标 Index	范围 Range(mg kg <sup>-1</sup> )	平均值 Mean(mg kg <sup>-1</sup> )	GB18596-2001 (mg kg <sup>-1</sup> )	GB8978-1996 (mg kg <sup>-1</sup> )	超标率 Over standardrate(%)
COD	1 555 ~ 51 800	14 482	≤400		100
NH <sub>4</sub> -N	428 ~ 4115	1 140	≤80		100
P	4.1 ~ 66.6	31.3	≤8		88
Cu	0.023 ~ 0.85	0.31		≤0.5	25
Zn	0.112 ~ 7.08	1.72		≤2	38

规模化养猪场周边接受水体的水质严重恶化,以总氮判别水质,调查水体中约有90.9%山塘、66.6%水库、50.0%河流水质属于劣V类(表8)。与河水相比,山塘水库水体水质恶化更为严重,这可能是因为山塘、水库属于相对封闭的静止水体,排入的污染物不断积累增加,水质容易受到影响。余江县五湖水库是鹰潭市的饮用水重要预备水源地,表7中样品中包含了一个五湖水库水样,其COD、NH<sub>4</sub>-N、总氮、总磷分别为13、0.63、1.95、0.14 mg L<sup>-1</sup>,以总氮或总磷判别水质,五湖水库水质,至少采样点附近水域水质为V类水,建议地方政府应当进一步加强五湖水库周边环境监管。朱凤连

等<sup>[25]</sup>研究显示五湖水库的重金属含量也明显高于水体背景值。由于红壤丘陵区独特的自然条件,很多猪场建在山塘水库周边,养猪与养鱼共同经营。但对于作为饮用水源地或水源预备地、观光旅游水上景区的水库,应控制库区周边集水区内的畜禽包括生猪养殖的数量,避免水体水质恶化与污染。

余江县规模化养猪场的猪粪还田(土)比例仅为50%左右,与过去传统的农田普遍实行猪粪还田不同,现在的猪粪还田一般仅限于猪场附近的稻田、菜地、苗圃、果园。猪场污水排放经常通过周边农田已有的灌排沟排污,当地农民也有引入猪场污水灌溉稻田或浇灌菜地的习惯。研究表明,猪场排

污口附近稻田的速效磷含量显著高于距离猪场较远稻田的速效磷含量,有的甚至超过  $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ,但碱解氮、速效钾却无显著差异;猪场排污口附近稻田的全铜、全锌含量也显著高于距离猪场较远稻田的全铜、全锌含量。相比于稻田,经常施用猪粪的菜地土壤的速效磷、速效钾、全铜、全锌含量更

高,但它们的碱解氮却无显著差异(表9)。因此,应当更加关注大量长期施用猪粪引起的磷素过量积累等问题。调查中观察到近排污口的水稻明显贪青晚熟,一些长期接受猪场污水的农田已不能种植农作物而荒芜,这可能是由于长期向农田随意排放养猪粪污,引起养分失衡和重金属积累的缘故。

表8 余江县规模化养猪场附近受纳水体的水质

Table 8 Quality of the receptor water bodies in the vicinity of the scale pig farms in Yujiang County, Jiangxi Province, China

水体类型 Type of water	样本数 Sample number	指标 Index	范围 Range ( $\text{mg L}^{-1}$ )	平均值 Mean ( $\text{mg L}^{-1}$ )	水质分级 <sup>1)</sup> Grading of water quality					
					I类 Grade I	II类 Grade II	III类 Grade III	IV类 Grade IV	V类 Grade V	劣V类 Sub-Grade V
山塘 Pond	11	pH <sup>2)</sup>	6.58 ~ 8.33	7.39						
		COD	0 ~ 21.0	7.55		63.6%	27.3%	9.1%		
		NH <sub>4</sub> -N	0.63 ~ 74.5	16.3			9.1%		18.2%	72.7%
		总氮 Total N	1.19 ~ 84.7	24.2				9.1%		90.9%
		总磷 Total P	0.03 ~ 6.86	1.85			18.2%	18.2%	9.1%	54.5%
水库 Reservoir	6	pH <sup>2)</sup>	6.80 ~ 8.44	7.24						
		COD	0 ~ 13.0	4.83	100%					
		NH <sub>4</sub> -N	0.39 ~ 23.8	5.20		16.7%	16.7%	16.7%		50.0%
		总氮 Total N	1.03 ~ 44.4	10.7				16.7%	16.7%	66.6%
		总磷 Total P	4.10 ~ 66.6	31.3	16.7%			16.7%	33.3%	33.3%
河流 River	4	pH <sup>2)</sup>	6.91 ~ 7.29	7.06						
		COD	0	0	100%					
		NH <sub>4</sub> -N	0.36 ~ 8.62	3.15		25.0%	25.0%			50.0%
		总氮 Total N	1.28 ~ 13.0	5.06				50.0%		50.0%
		总磷 Total P	0.10 ~ 1.29	0.38		25.0%	50%			25.0%

1) 根据国标 GB3838-2002 According to the national standard GB3838-2002; 2) 无量纲 Dimensionless

表9 规模化养猪场附近农田土壤养分和重金属含量

Table 9 Contents of N, P, K, Cu and Zn in farmland soils around scale pig farms in Yujiang County, Jiangxi Province, China

采样位置 Sampling site	样本数 Sample number	碱解氮 Alkalined N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	全铜 Total Cu	全锌 Total Zn
( $\text{mg kg}^{-1}$ )						
近猪场稻田 Paddy soil close to pig farm	5	241.6	124.4	93.1	43.73	99.02
远猪场稻田 Paddy soil far from pig farm	5	232.9	32.0	99.7	18.96	56.37
施用猪粪的菜地 Vegetable soil applied with pig dung	5	248.6	244.7	428.5	75.46	186.1

### 3 结论

本文以南方红壤丘陵典型地区——江西省余江县为案例在县域尺度研究了规模化养猪业的发展与排污状况及其对周边水体与土壤环境的影响。

该县的规模化养猪业已具有一定规模,且集中分布于局部地区,养猪所产生的固液废弃物及其含有的主要污染物质的数量十分可观。由于各种原因,当地规模化养猪场的粪污尚未能得到有效处理,养猪场周边受纳水体的水质已严重恶化,周边农田土壤也表现出一定程度的养分失衡与明显的重金属 Cu、

Zn 积累。虽然规模化养猪是生猪养殖的大趋势,但在当地已产生了巨大的环境压力,尤其是水体污染风险甚大。余江县的规模化养猪业及其产生的环境污染问题在在南方红壤丘陵地区具有一定的代表性,建议加强规模化养猪粪污无害化、资源化循环利用技术的研究,加强当地主要土地利用方式的猪粪安全消纳量的研究,优化传统的“种养结合”生产模式,并制定区域生猪养殖业发展规划,引导猪场合理布局,促进红壤丘陵区规模养殖业健康发展与生态环境保护。此外,在规模化养猪集中分布区,需要重视对水体的长期动态监测,避免水污染事态发生。本文仅分析了规模化养猪的固液废弃物的环境影响,有关规模化养猪业所引起的空气污染以及其他污染物质包括病原菌和抗生素污染风险有待进一步研究。

## 参考文献

- [ 1 ] 国家统计局. 2010 年国民经济和社会发展统计公报. 2011. National Bureau of Statistics. Statistical communiqué on national economic and social development of China in 2010 (In Chinese). 2011
- [ 2 ] 李俊柱. 中国养猪业未来 10 年发展趋势. 猪业科学, 2012 (2): 114—115. Li J Z. Development trend of swine production in China in coming ten years (In Chinese). Swine Industry Science, 2012(2): 114—115
- [ 3 ] 黄微, 徐顺来. 中国养猪业现状与发展方向. 畜禽业, 2011 (9): 4—8. Huang W, Xu S L. Status quos and development trend of swine production in China (In Chinese). Livestock and Poultry Industry, 2011(9): 4—8
- [ 4 ] 周俊玲. 发达国家养殖业污染的防治对策与启示. 中国牧业通讯, 2007(5): 74—77. Zhou J L. Countermeasures to pollution of animal husbandry in developed countries and lessons from them (In Chinese). Bulletin of Chinese Animal Husbandry, 2007(5): 74—77
- [ 5 ] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. Nature and Ecology Conservation Section, State Environmental Protection Administration. Investigation and countermeasures of pollution by livestock and poultry industries in China (In Chinese). Beijing: China Environmental Science Press, 2002
- [ 6 ] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应. 中国环境科学 2006, 26(5): 614—617. Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China (In Chinese). China Environmental Science, 2006, 26(5): 614—617
- [ 7 ] 仇焕广, 严健标, 蔡亚庆, 等. 我国专业畜禽养殖的污染排放与治理对策分析——基于五省调查的实证研究. 农业技术经济, 2012(5): 29—35. Qiu H G, Yan J B, Cai Y Q, et al. Study on pollutant emission and countermeasures of industrialized livestock and poultry farming in China, based on a survey of five provinces (In Chinese). Agrotechnical Economy, 2012(5): 29—35
- [ 8 ] 中国畜牧业年鉴编辑委员会. 中国畜牧业年鉴 2011. 北京: 中国农业出版社, 2012. Editorial Committee for China Animal Husbandry Yearbook. China animal husbandry yearbook 2011 (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2012
- [ 9 ] 欧阳克蕙, 王文君, 周萍芳, 等. 江西省畜禽粪尿资源分布及其污染潜势估算. 江西农业大学学报, 2009, 31(4): 616—620. Ouyang K H, Wang W J, Zhou P F, et al. Assessment of the production of animal manure and its pollution potential in Jiangxi Province (In Chinese). Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(4): 616—620
- [ 10 ] 余江县统计局. 2010 年余江县国民经济和社会发展统计公报. 2011. Bureau of Statistics of Yujiang County. Statistical communiqué on national economic and social development of Yujiang County in 2010 (In Chinese). 2011
- [ 11 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration. Methods of monitoring and analyzing water and wastewater (In Chinese). 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002
- [ 12 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 13 ] 徐谦, 朱桂珍, 向俐云. 北京市规模化畜禽养殖场污染调查与防治对策研究. 农村生态环境, 2002, 18(2): 24—28. Xu Q, Zhu G Z, Xiang L Y. Pollution from large-scaled livestock and poultry breeding farms in Beijing and its control (In Chinese). Rural Eco-Environment, 2002, 18(2): 24—28
- [ 14 ] 田宗祥, 张玲清. 规模化养猪场排泄物和污水铜、锌含量的检测. 畜牧与兽医, 2010, 42(7): 45—46. Tian Z X, Zhang L Q. Cu and Zn content in excrements and wastewater from an industrial pig farm (In Chinese). Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2010, 42(7): 45—46
- [ 15 ] 姜萍, 金盛杨, 郝秀珍, 等. 重金属在猪饲料-粪便-土壤-蔬菜中的分布特征研究. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 942—947. Jiang P, Jin S Y, Hao X Z, et al. Distribution characteristics of heavy metals in feeds, pig manures, soils and vegetables (In Chinese). Journal of Agro-Environmental Science, 2010, 29(5): 942—947
- [ 16 ] 齐建硕. 基于 ArcView 的县乡级土地利用规划图的制作. 测绘技术装备, 2007, 9(2): 37—38. Qi J S. Arcview-based making of land use and planning map on a county or township level (In Chinese). Geomatics Technology and Equipment, 2007, 9(2): 37—38
- [ 17 ] Cui J, Zhou J, Yang H, et al. Atmospheric NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> deposition into a typical agro-ecosystem in Southeast China. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13: 3216—3221
- [ 18 ] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究. 土壤学报, 2008, 45(2): 280—288. Wang T J, Liu Q, Zhao H, et al. Atmospheric nitrogen deposition in agroecosystem in red soil region of Jiangxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 280—288
- [ 19 ] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有害成



- 分测定分析研究. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 822—829. Zhang S Q, Zhang F D, Liu X M, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6): 822—829
- [20] 李书田, 刘荣乐, 陕红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179—184. Li S T, Liu R L, Shan H. Nutrient contents in main animal manures in China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179—184
- [21] Nicholson F A, Chambers B J, Williams J R, et al. Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresources and Technology*, 1999, 70(1): 23—31
- [22] 何余湧, 吴志勇, 谢国强, 等. 生猪养殖小区污水处理前后污染物产量及浓度的变化研究. 安徽农业科学, 2010, 38(28): 15662—15664. He Y Y, Wu Z Y, Xie G Q, et al. Production and pollutants concentration of pig farm wastewater treated before and after with methane tank (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(28): 15662—15664
- [23] 莫琼才, 张冰. 规模养殖场污水处理和综合利用试验. 畜牧与兽医, 2011, 43(6): 110—111. Mo Q C, Zhang B. An investigation on treatment and utilization of wastewater from an industrial livestock farm (In Chinese). *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2011, 43(6): 110—111
- [24] 张安来, 朱飞虹. 畜禽养殖场(小区)污水“厌氧—人工湿地”处理模式的研究及示范. 可再生能源, 2010, 28(3): 103—106. Zhang A L, Zhu F H. Research and demonstration on Anaerobic-Constructed Wetland treatment model for livestock and poultry farms (district) sewage (In Chinese). *Renewable Energy Resources*, 2010, 28(3): 103—106
- [25] 朱凤莲, 周静, 马友华, 等. 水体重金属污染状况及其与养殖场排污之间关系的探讨. 农业环境与发展, 2007, 24(6): 19—21. Zhu F L, Zhou J, Ma Y H, et al. Study on the relationship between heavy metal pollution of water and waste discharge from livestock farms (In Chinese). *Agro-Environment and Development*, 2007, 24(6): 19—21

## SCALE PIG FARMING AND ITS IMPACTS ON SOIL AND WATER ENVIRONMENT IN RED SOIL HILLY REGIONS: A CASE STUDY OF YUJIANG COUNTY, JIANGXI PROVINCE, CHINA

Zhou Zhigao<sup>1</sup> Li Zhongpei<sup>1</sup> He Yuanqiu<sup>1</sup> Wang Xingxiang<sup>1,2†</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Jiangxi Key Laboratory of Ecological Research of Red Soil, Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China)

**Abstract** Development of scale pig farming and its impacts on circumjacent soil and water environment in Yujiang County, Jiangxi Province, a red soil hilly region typical of South China were selected for case study. It was found that the county had 389 scale pig farms, turning out a total of  $7.32 \times 10^5$  heads in 2011. Of the pig farms, 50.6% had an annual production capacity of 1 000 ~ 5 000 heads each. These pig farms were mainly distributed in the low-hilly areas in the center and south of Yujiang County, particularly alongside State Highway No. 320. They turned out annually a total of  $2.96 \times 10^5$  t,  $4.64 \times 10^5$  t and  $1.09 \times 10^6$  t of pig dung, urine and wastewater, respectively, with which a total of  $1.96 \times 10^4$  t,  $3.27 \times 10^3$  t,  $1.25 \times 10^3$  t, 50 t and 116 t of COD, N, P, Cu, and Zn, respectively, was discharged annually as pollutants. On such a basis this county is estimated to have 1.1 million heads of pigs, which may produce annually a total of  $4.47 \times 10^5$  t,  $7.00 \times 10^5$  t and  $1.09 \times 10^6$  t of dung, urine and wastewater, respectively, with which a total of  $2.96 \times 10^4$  t,  $4.94 \times 10^3$  t,  $1.89 \times 10^3$  t, 76 t and 176 t of COD, N, P, Cu and Zn is discharged, respectively. Sampling analysis shows that 90.9% of the ponds and 66.6% of the reservoirs and 50% of the rivers in their surroundings are in Sub-Grade V in water quality, and the soils nearby were badly unbalanced, with available P over-accumulated and heavy metals like Cu and Zn significantly accumulated. It is therefore essential to strengthen planning in development of pig farming in the region, and intensify research on technologies for deharming and recycling of pig dung, urine and wastewater, hence to promote healthy development of scale pig farming and environment protection in red soil hilly areas of South China.

**Key words** Scale pig farming; Discharges; Water pollution; P accumulation; Red soil hilly region